Analoge vermenigvuldigers

Het is zonder meer een feit dat een hobby-elektronicus zijn hele leven uitermate gelukkig kan doorbrengen zonder ooit een analoge vermenigvuldiger in de hand te hebben genomen. Toch hebben deze (dure) schakelingen nuttige toepassingen, die ook in de hobby-sfeer van pas kunnen komen.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 07-10-2019

Wat zijn analoge vermenigvuldigers

Vermenigvuldigen van twee spanningen
Analoge vermenigvuldigers (*analog multipliers*) zijn schakelingen die in de meest eenvoudige uitvoering het wiskundige product berekenen van twee analoge spanningen U_x en U_y. De spanning U_{uit} op de uitgang wordt dus gegeven door de wiskundige formule:
$U_{uit} = C \bullet U_x \bullet U_y$
De spanning op de uitgang is gelijk aan het product van de twee ingangsspanningen, vermenigvuldigd met een schaalfactor C. Deze factor bepaalt de versterking van de schakeling. Meestal is deze factor kleiner dan 1, zodat u ook het product kunt berekenen van spanningen die groter zijn dan 4 V. Zonder deze factor zou het resultaat van twee ingangsspanningen van 4 V een uitgangsspanning van 16 V zijn, hetgeen buiten het voedingsbereik van de meeste vermenigvuldigers valt. Door nu C in te stellen op 0,1 wordt de uitgangsspanning in dit voorbeeld slechts 1,6 V, een spanning die uiteraard goed door de schakeling geproduceerd kan worden.

Soorten analoge vermenigvuldigers
Er bestaan drie soorten analoge vermenigvuldigers:

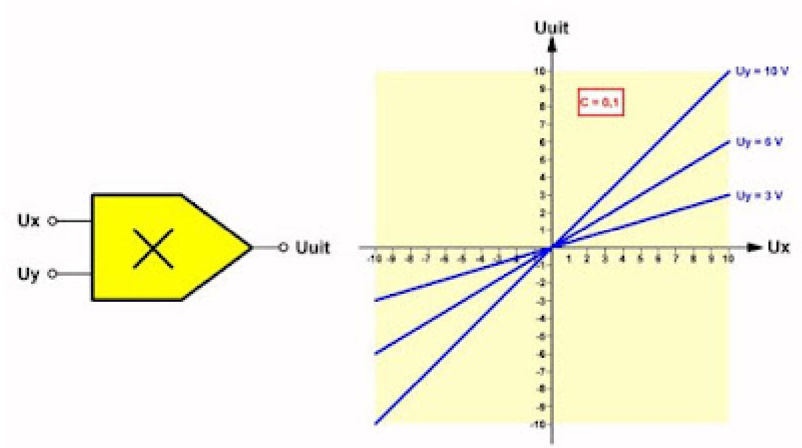
- **Een-quadrant schakelingen**
  Hierbij moeten beide ingangsspanningen altijd positief of negatief zijn, zodat de uitgangsspanning altijd positief is. De wiskundige vermenigvuldiging van twee negatieve getallen levert immers een positief resultaat op.
- **Twee-quadrant schakelingen**
  Hierbij moet één ingangsspanning altijd positief of negatief zijn, maar mag de tweede ingangsspanning bipolair (dus + of -) zijn. De uitgangsspanning kan zowel positief als negatief zijn.
- **Vier-quadrant schakelingen**
  Bij deze IC's mogen beide ingangsspanningen bipolair zijn en zal de uitgangsspanning dus zowel positief als negatief kunnen worden.

Naast deze indeling in werkingsgebied kunt u ook nog een indeling maken in ingangsgrootheid:

- **Spanningsgestuurd**
  Bij deze schakelingen moet u spanningen aan de ingangen aanbieden en zal ook de uitgang een spanning genereren.
- **Stroomgestuurd**
  Bij deze schakelingen moet u de ingangspennen met stromen sturen zodat u in de

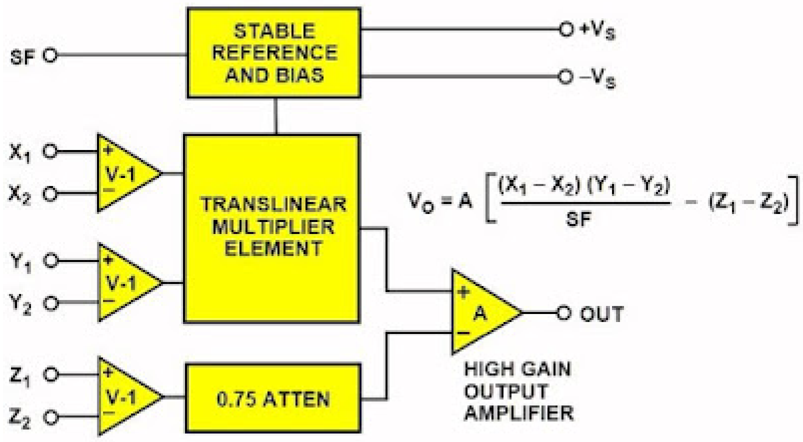
meeste gevallen serieweerstanden moet opnemen om de spanningen die u wilt aanbieden om te zetten in stromen.

Symbool en transfer-karakteristiek
Het symbool en de transfer-karakteristiek van een analoge vermenigvuldiger zijn getekend in de onderstaande figuur. Deze karakteristiek geeft het verband tussen de twee ingangsspanningen en de uitgangsspanning. De ene ingangsspanning U_x wordt voorgesteld door de horizontale as. De verticale as levert de waarde van de uitgangsspanning U_{uit}. De tweede ingangsspanning U_y is de parameter van de grafiek, dat wil zeggen dat iedere getekende lijn overeen komt met een bepaalde waarde van U_y. Uit deze transfer-karakteristiek blijkt dat een analoge vermenigvuldiger in wezen een lineaire schakeling is, hoewel de elektronica die noodzakelijk is om twee spanningen met elkaar te vermenigvuldigen alles behalve lineair werkt!



Het symbool en de transfer-karakteristiek van een analoge vermenigvuldiger.
(© 2019 Jos Verstraten)

Analoge vermenigvuldigers met extra's
In de inleiding werd reeds gesteld dat de eenvoudigste schakelingen alleen het product van twee naar de massa gerefereerde spanningen berekenen. Er zijn echter schakelingen in de handel, zoals de AD534, die iets meer mogelijkheden hebben. Dit IC heeft differentiële X- en Y-ingangen. U kunt dus ook niet aan de massa gerefereerde spanningen met elkaar vermenigvuldigen. Dat is heel handig als u bijvoorbeeld het opgenomen vermogen van een verbruiker wilt meten. Vervolgens heeft de AD534 schakeling een derde differentiële ingang, die meestal Z genoemd wordt. Deze ingang is niet in de vermenigvuldiging betrokken, maar zorgt voor een bepaalde factor [Z1 - Z2], die u van het berekende product kunt aftrekken of er bij kan optellen. De AD534 heeft tot slot een ingang SF waarmee u de schaalfactor extern kunt regelen.
Daarnaast zijn er schakelingen, zoals de MC1494, die twee symmetrische referentiespanningen leveren waarmee u de schakeling kunt afregelen.



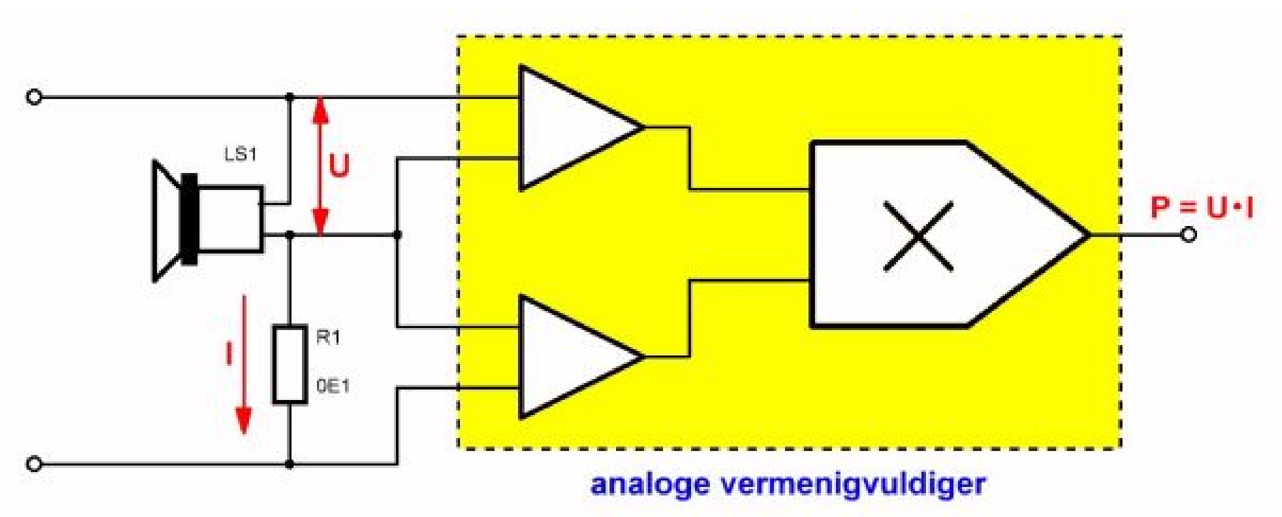
Het intern blokschema van de AD534. (© Analog Devices)

Toepassingen van analoge vermenigvuldigers

Wiskundige bewerkingen uitvoeren
Met vier-quadrant vermenigvuldigers kunt u de basisbewerkingen van de wiskunde uitvoeren:
- Vermenigvuldigen ($U_{uit} = U_x \bullet U_y$)
- Delen ($U_{uit} = U_x / U_y$)
- Kwadrateren ($U_{uit} = U_x^2$)
- Wortel trekken ($U_{uit} = \sqrt{U_x}$)

Met deze vier bewerkingen kunt u een aantal elektronisch belangrijke functies uitvoeren. De enige voorwaarde is dat u in staat bent de ingangsvariabelen aan te leveren als gelijk- of wisselspanningen.

Meten van vermogens
De wiskundige uitdrukking voor elektrisch vermogen is gelijk aan:
$P = U \bullet I$
Het vermogen dat in een weerstand wordt verbruikt is gelijk aan de vermenigvuldiging van de spanning over de weerstand en de stroom door de weerstand. Het zal duidelijk zijn dat u dergelijke metingen niet rechtstreeks kunt uitvoeren als u geen analoge vermenigvuldiger in huis hebt. Het zal verder duidelijk zijn dat vermenigvuldigers met differentiële ingangen hiervoor heel handig zijn. Eén differentiële ingang meet de spanning over een gebruiker, de tweede differentiële ingang meet de spanning over een kleine stroomsensor weerstand, in serie met de verbruiker. De schakeling berekent netjes het in de verbruiker gedissipeerde vermogen en biedt dit aan onder de vorm van een uitgangsspanning, die op een in Watt geijkte meter geregistreerd kan worden.
In de onderstaande figuur is een voorbeeld van deze techniek geschetst. De bedoeling is het door een eindversterker aan een luidspreker aangeboden elektrisch vermogen te meten. De spanning over de luidspreker LS1 wordt door één verschil-ingang van de analoge vermenigvuldiger berekend. De stroom door de luidspreker wordt gemeten door de spanningsval over een kleine weerstand R1 van 0,1 Ω aan de tweede verschil-ingang van de vermenigvuldiger aan te bieden. Na het invoeren van een schaalfactor wordt de vermenigvuldiging uitgevoerd en staat op de uitgang van de schakeling een spanning die recht evenredig is met het echte effectieve vermogen dat in de luidspreker wordt gedissipeerd. Deze uitgangsspanning wordt dan met een nauwkeurige gelijkrichter omgezet in een gelijkspanning en u kunt het resultaat analoog of digitaal meten.
Het grote voordeel van deze methode is dat de niet constante impedantie van de luidspreker geen meetfout introduceert. U meet immers het échte vermogen volgens de wetten van de natuurkunde.



Het meten van het luidsprekervermogen van een eindversterker.
(© 2019 Jos Verstraten)

Automatische amplituderegelingen
U kunt analoge vermenigvuldigers gebruiken om de grootte van een wisselspanning door middel van een gelijkspanning te regelen. Als u immers aan één ingang van de vermenigvuldiger de wisselspanning aansluit en de regelspanning aan de tweede ingang, dan zal het product op de uitgang gelijk zijn aan de wisselspanning, vermenigvuldigd met de constante gelijkspanning. De vermenigvuldiger wordt dan een gelijkspanning gestuurde wisselspanningsversterker.

Moduleren
Ook voor amplitudemodulatie kunt u analoge vermenigvuldigers inzetten. Modulatie is immers niets anders dan een vermenigvuldiging van twee wisselspanningen, waarvan de frequenties ver uit elkaar liggen. Sluit u op één ingang van een analoge vermenigvuldiger een hoogfrequente draaggolf aan en op de andere ingang een laagfrequent modulatiesignaal, dan zal de vermenigvuldiger zonder externe componenten een gemoduleerde draaggolf op de uitgang aanbieden.

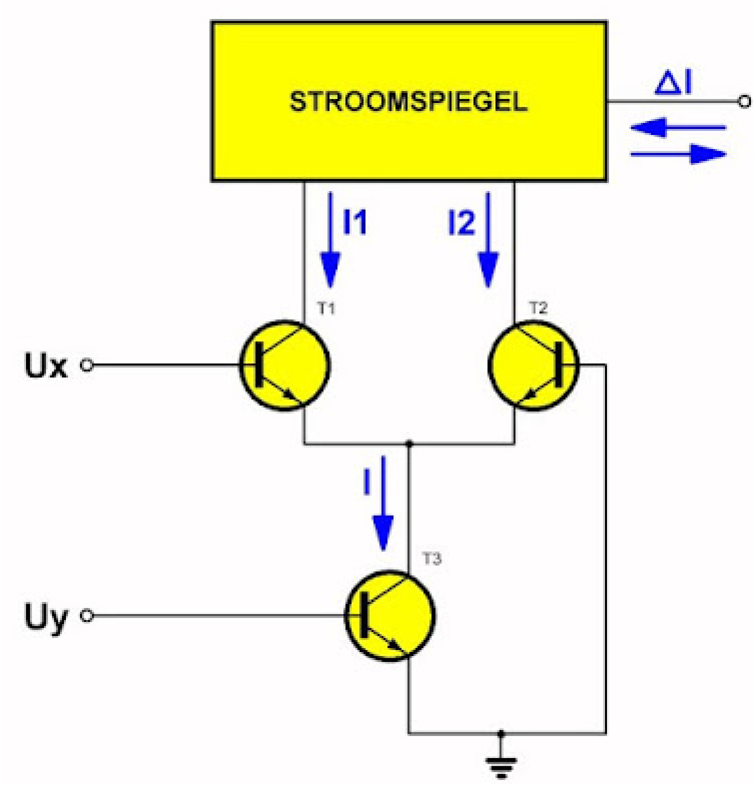
Berekenen van effectieve waarden
Ook voor het omzetten van een wisselspanning in een gelijkspanning waarvan de grootte een maat is voor de echte effectieve waarde van de wisselspanning (U_{rms}) kunt u met succes analoge vermenigvuldigers uit de kast halen. De effectieve waarde is per definitie gelijk aan de vierkantswortel uit het gemiddelde kwadraat van de wisselspanning. Door middel van analoge vermenigvuldigers kunt u zowel het kwadraat als de vierkantswortel berekenen.

Frequentieverdubbeling
Een minder voor de hand liggende toepassing van analoge vermenigvuldigers is het verdubbelen van de frequentie van een sinusvormige wisselspanning. Het volstaat beide ingangen van de vermenigvuldiger met de sinusvormige ingangsspanning te verbinden. Op de uitgang van de schakeling ontstaat de gekwadrateerde ingangsspanning. Men kan nu wiskundig bewijzen dat deze spanning een frequentie heeft die precies gelijk is aan twee maal de frequentie van het ingangssignaal. Als de schakeling zonder vervormingen werkt, zijn er bovendien absoluut geen harmonischen van het ingangssignaal op de uitgang aanwezig!

De werking van analoge vermenigvuldigers

Inleiding
Hoewel er niet veel elektronica in een analoge vermenigvuldiger hoeft te zitten, zijn het toch tamelijk ingewikkelde schakelingen. De werking is in feite alleen wiskundig volledig te doorgronden, iets dat op deze plaats echter niet zal gebeuren. Wij proberen de werking fysisch uit te leggen.

De Gilbert-schakeling
Alle moderne analoge vermenigvuldigers werken volgens het Gilbert-principe. De meest principiële uitvoering van deze schakeling is getekend in de onderstaande figuur. Twee transistoren T1 en T2 worden gestuurd uit een stroomspiegel. Dat is een schakeling die in staat is het verschil te berekenen tussen de twee collectorstromen I_1 en I_2. De twee collectorstromen worden opgeteld en doorlopen als I een derde transistor T3. De twee te vermenigvuldigen spanningen U_x en U_y worden aangeboden aan de basissen van T1 en T3. Men kan nu wiskundig aantonen dat de verschil-stroom ΔI tussen I_1 en I_2, die door de stroomspiegel wordt berekend, recht evenredig is met het product tussen beide ingangsspanningen Ux en Uy:
$\Delta I = k \bullet U_x \bullet U_y$

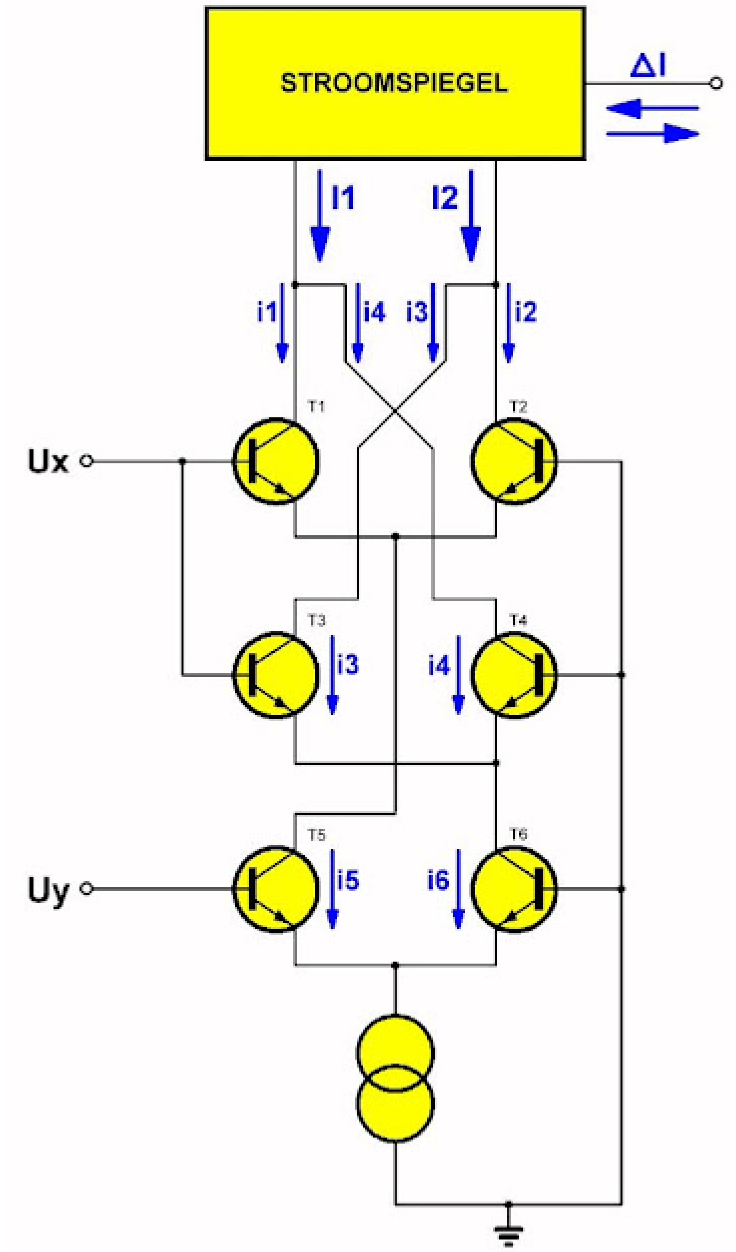


Het hart van een elektronische vermenigvuldiger wordt gevormd door deze Gilbert-schakeling. (© 2019 Jos Verstraten)

Een en ander is eenvoudig aan te tonen voor de gevallen waarbij een van beide ingangsspanningen nul wordt. Als U_x gelijk is aan nul zullen T1 en T2 identieke basis/emitter-spanningen hebben. De basis van T2 ligt immers ook aan de massa. In de veronderstelling dat alle transistoren identieke eigenschappen hebben zullen ook beide collectorstromen aan elkaar gelijk zijn. Het stroomverschil tussen deze stromen is dus nul, de stroomspiegel levert geen signaal af.
Als U_y gelijk aan nul wordt zal T3 sperren. Het gevolg is dat I_1 en I_2 beide nul zijn en er weer geen stroomverschil aanwezig is. De stroomspiegel levert ook nu geen signaal af.
Op deze eenvoudige manier kunt u in ieder geval aanvoelen dat de schakeling voldoet aan de fundamentele wet van vermenigvuldiging: als één van de te vermenigvuldigen grootheden gelijk is aan nul, dan zal ook het resultaat van de vermenigvuldiging nul zijn.

De vier-quadrant uitvoering
De beschreven schakeling werkt in slechts één quadrant. U kunt echter in vier quadranten werken door de schakeling uit te breiden tot het systeem van de onderstaande figuur. Deze schakeling vormt op de een of andere manier altijd het hart van een analoge vermenigvuldiger. De schakeling heeft drie verschil-versterkers met gemeenschappelijke emitters. Ook nu kunt u de werking alleen wiskundig bewijzen. Maar ook nu kunt u aanvoelen dat de schakeling aan de fundamentele vermenigvuldigingswet voldoet. Als u de ingangsspanning U_x nul maakt, dan zijn T1 en T2 en T3 en T4 identiek ingesteld:
$i_1 = i_2$
$i_3 = i_4$
Hieruit volgt:
$I_1 = i_1 + i_4 = I_2 = i_2 + i_3$
Met andere woorden:
$I_1 = I_2$
Het stroomverschil is nul, zodat de stroomspiegel geen signaal aflevert.
Als u de tweede ingangsspanning Uy gelijk aan nul maakt, dan worden de transistoren T5 en T6 identiek ingesteld:
$i_5 = i_6$
Omdat T1 en T3 door Ux worden ingesteld geldt:
$i_1 = i_3$

Maar natuurlijk geldt ook:
$i_2 = i_4$
Nu even wat simpele optelsommetjes:
$i_5 = i_1 + i_2$
$i_6 = i_3 + i_4$
$i_1 + i_2 = i_3 + i_4$
$i_1 + i_4 = i_2 + i_3$
Met als besluit:
$I_1 = I_2$
Ook nu levert de schakeling geen verschil-stroom, zodat de stroomspiegel geen signaal aflevert.
Als een van de ingangsspanningen gelijk is aan nul zal de uitgebreide Gilbert-schakeling geen spanning afleveren.



Deze uitgebreide Gilbert-schakeling werkt in vier quadranten.
(© 2019 Jos Verstraten)

Overzicht van de beschikbare typen

Analog Devices nog goed leverbaar
Ooit was er een tijd dat iedere zichzelf respecterende analoge IC-fabrikant wel een paar

analoge vermenigvuldigers in het pakket had zitten. Op dit moment is alleen Analog Devices nog actief op dit gebied met een tiental exemplaren die nog steeds worden geproduceerd. Van die tien zijn er vier goed leverbaar door de bekende elektronica postorderbedrijven. Daarnaast worden via eBay nog heel veel MC1494's aangeboden tegen zeer uiteenlopende prijzen. Dat IC was ooit een paradepaardje van Motorola en er zijn ontelbare toepassingen van dit IC op Google te vinden. Alle IC's van de AD-serie worden ook via AliExpress aangeboden, soms tegen absolute bodemprijzen.

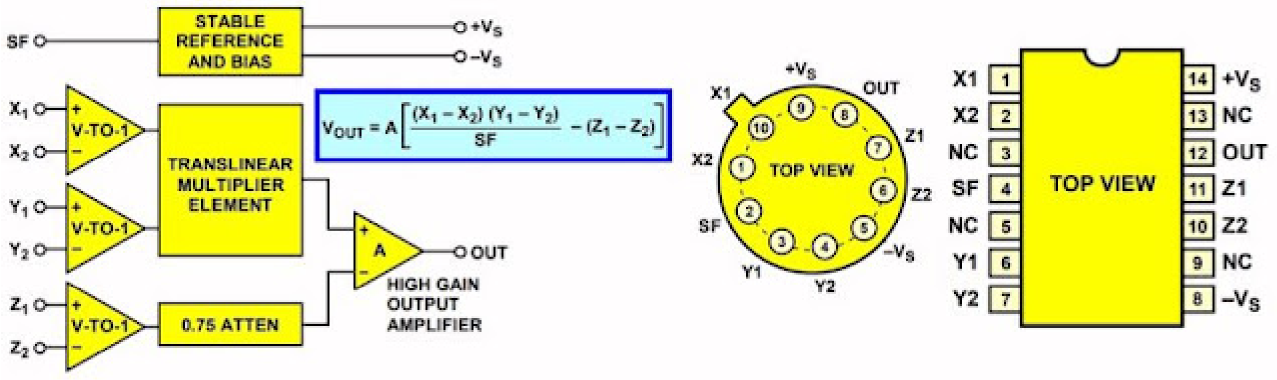
TYPE	RICHTPRIJS	CONRAD	REICHELT	SINUSS	ALIEXPRESS	EBAY
AD534	€ 55,00	•		•	•	•
AD633	€ 12,00	•	•	•	•	•
AD734	€ 45,00	•		•	•	•
AD834	€ 30,00			•	•	•
MC1494	€ 15,00					•

Een overzicht van de goed leverbare schakelingen. (© 2019 Jos Verstraten)

Diverse nauwkeurigheden, diverse prijzen
Bij de bespreking van de Gilbert-schakeling werd uitgegaan van een absolute gelijkheid van de transistoren van de verschil-versterkers. Nu zal dat in de praktijk uiteraard nooit het geval zijn. Deze kleine verschillen introduceren offsetfouten, die gecompenseerd moeten worden. Er worden schakelingen aangeboden waarbij deze offsetfouten gedurende de fabricage van de chip's worden gecompenseerd door middel van laserstralen die weerstanden op de chip 'wegbranden'. Deze IC's zijn echter tamelijk prijzig. Het gevolg is dat er van een en hetzelfde type diverse uitvoeringen worden aangeboden in diverse nauwkeurigheidsklassen en met diverse prijzen.
Van de AD534 worden bijvoorbeeld drie uitvoeringen aangeboden met als achtervoegsels J, K en L met totale nauwkeurigheden van respectievelijk ±1,0 %, ±0,5 % en ±0,25 %. De prijsverschillen zijn aanzienlijk en kunnen tientallen euro's bedragen! U kunt de in de bovenstaande tabel vermelde richtprijzen dus hoogstens als een indicatie opvatten.

De AD534 van Analog Devices
De AD534 is een laser-getrimde vier-quadrant multiplier met twee verschil-ingangen en een extra verschil-versterker Z, waardoor u een bepaalde constante factor van de uitgangsspanning kunt aftrekken of er bij optellen. In de onderstaande figuur hebben wij het intern blokschema en de aansluitgegevens van de twee leverbare behuizingen samengevat. De transfer-functie van de schakeling is voorgesteld in het blauwe kader.

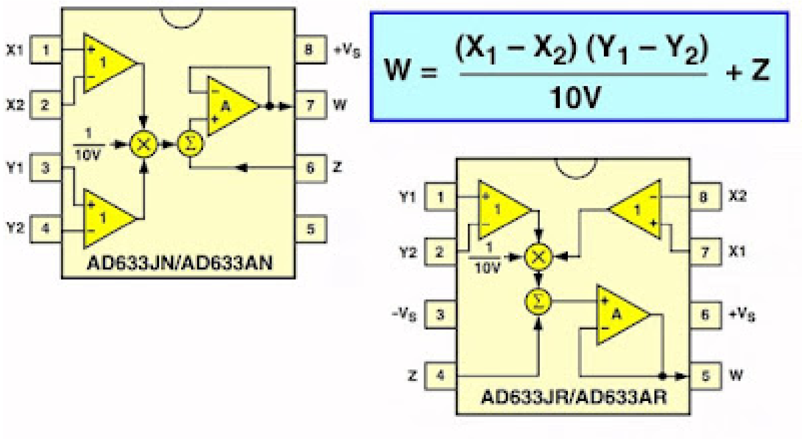
- **Voedingsspanning:** ±18 V
- **Ruststroom:** 6 mA
- **Ingangsspanningen:** ±voeding
- **Ingangsweerstanden:** 10 MΩ
- **Totale onnauwkeurigheid:** ±1,0 % tot ±0,25 %
- **Klein-signaal bandbreedte (0,1 V uit):** 1 MHz
- **Slew-rate:** 20 V/µs
- **Uitgangsspanning:** ±11,0 V
- **Uitgangsimpedantie:** 0,1 Ω
- **Open-lus versterking:** 70 dB



De gegevens van de AD534. (© Analog Devices)

De AD633 van Analog Devices
Ondanks de lage prijs wordt ook deze schakeling laser-getrimd, maar op een nauwkeurigheid van slechts ±2,0 %. De X- en Y-ingangen zijn als verschil-versterker uitgevoerd, de uitgang is gebufferd. Ook deze schakeling heeft een Z-ingang, maar deze is enkelvoudig uitgevoerd. De aansluitgegevens van de DIL-8 uitvoering (JN/AN) en deze van de SO-8 behuizing (JR/AR) en de transfer-functie zijn voorgesteld in de onderstaande figuur.

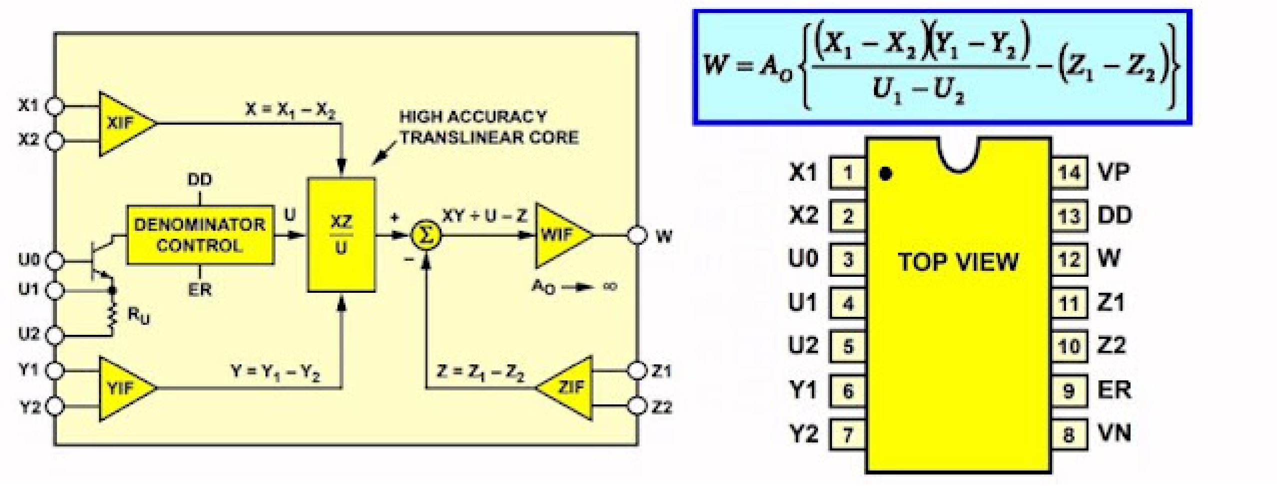
- **Voedingsspanning:** ±15 V
- **Ruststroom:** 6 mA
- **Ingangsspanningen:** ±10,0 V
- **Ingangsweerstanden:** 10 MΩ
- **Totale onnauwkeurigheid:** ±2,0 % tot ±1,0 %
- **Klein-signaal bandbreedte (0,1 V uit):** 1 MHz
- **Slew-rate:** 20 V/µs
- **Uitgangsspanning:** ±11,0 V
- **Uitgangsimpedantie:** 0,1 Ω
- **Open-lus versterking:** 70 dB



De gegevens van de AD633. (© Analog Devices)

De AD734 van Analog Devices
Een breedbandige vier-quadrant analoge vermenigvuldiger met differentiële X-, Y- en Z-ingangen en met een maximale onnauwkeurigheid van ±0,1 %.

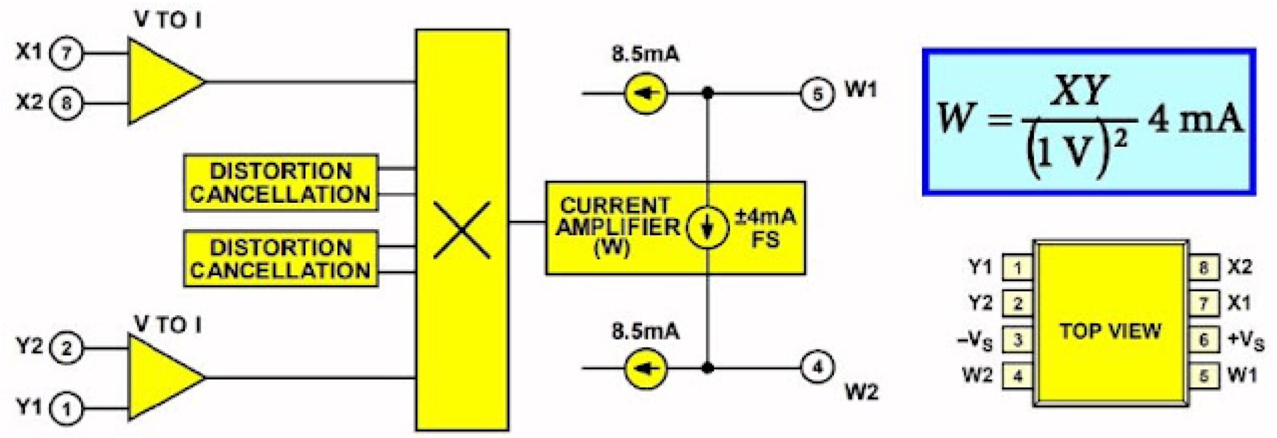
- **Voedingsspanning:** ±16,5 V
- **Ruststroom:** 12 mA
- **Ingangsspanningen:** ±12,5 V
- **Totale onnauwkeurigheid:** ±2,0 % tot ±1,0 %
- **Klein-signaal bandbreedte (0,1 V uit):** 40 MHz
- **Slew-rate:** 450 V/µs
- **Uitgangsspanning:** ±12,0 V
- **Uitgangsimpedantie:** 0,1 Ω
- **Open-lus versterking:** 72 dB



De gegevens van de AD734. (© Analog Devices)

De AD834 van Analog Devices
Dit is een zeer breedbandige (500 MHz) multiplier met twee laagohmige differentiële ingangen. De uitgangstrap bestaat echter uit twee differentiële open collector trappen die stroom aan de uitgangen leveren. Als u deze uitgang wilt omzetten in een spanning moet u een stroom-naar-spanning omvormer achter de AD834 schakelen.

- **Voedingsspanning:** ±9,0 V
- **Ruststroom:** +14/-35 mA
- **Ingangsspanningen:** ±1,3 V
- **Ingangsweerstanden:** 25 kΩ
- **Totale onnauwkeurigheid:** ±2,0 % tot ±0,5 %
- **Bandbreedte:** 500 MHz
- **Uitgangsstromen:** ±4,0 mA

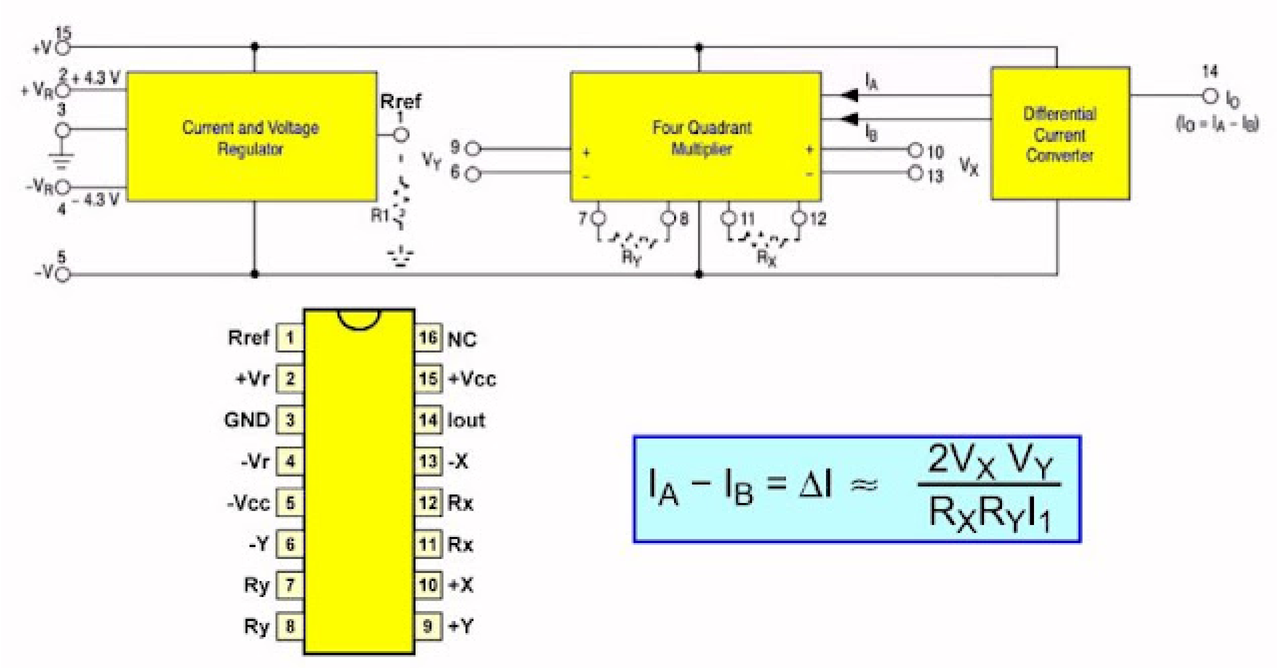


De gegevens van de AD834. (© Analog Devices)

De MC1494 van Motorola / ON Semiconductor
Deze multiplier, die officieel *'obsolete'* is verklaard, was in de glorietijd van de analoge elektronica de bekendste analoge vermenigvuldiger. De schakeling heeft twee differentiële ingangen en een stroomuitgang. Om deze stroom om te zetten in een uitgangsspanning volstaat het een weerstand tussen de uitgang en de massa te schakelen. Bovendien bevat de chip twee spanningsreferenties, een positieve en een negatieve, waarmee u de multiplier kunt afregelen op maximale lineariteit en minimale offset. De ingangen X en Y hebben zeer hoge ingangsweerstanden.

- **Voedingsspanning:** ±15,0 V
- **Ruststroom:** ±12 mA
- **Ingangsspanningen:** ±10,0 V
- **Ingangsweerstanden:** 300 MΩ
- **Totale onnauwkeurigheid:** ±1,0 % tot ±0,5 %
- **Klein-signaal bandbreedte:** 1,0 MHz
- **Uitgangsspanning:** ±10,0 V

- Uitgangsweerstand: 850 kΩ
- Referentiespanningen: ±3,5 V tot ±5,0 V



De gegevens van de MC1494. (© 2019 Jos Verstraten)

Praktische schakelingen met analoge vermenigvuldigers

Het afregelen van de MC1494
In de onderstaande figuur is het standaard schema getekend waarmee u de MC1494 kunt toepassen voor het vermenigvuldigen van twee ingangsspanningen. In dit schema zijn ook de vier instelpotentiometers getekend die u moet afregelen om de schakeling optimaal te laten functioneren. De op-amp MC1456 kan door een willekeurige op-amp worden vervangen. Deze op-amp is niets meer dan een simpele stroom-naar-spanning omvormer. De volledige schakeling voldoet aan de wiskundige vergelijking:
$U_{uit} = -[1/10 \bullet (U_x \bullet U_y)]$
Als u dus aan de X-ingangen een spanning van 2,0 V aanlegt en aan de Y-ingang een spanning van 3,0 V, dan zal op de uitgang een spanning van -0,6 V verschijnen.
Het principe van het afregelen is dat de differentiële ingangen worden opgeofferd. Aan één ingang wordt het ingangssignaal gelegd. Aan de tweede ingang komt een kleine instelspanning die de afregeling en ijking van de schakeling verzorgt.
Voor het afregelen van de vier instelpotentiometers hebt u een sinusgenerator en een oscilloscoop nodig.

Afregelen van de offset op de X-ingang
- Sluit een sinus van 1,0 kHz, 5,0 $V_{top\text{-}tot\text{-}top}$ aan op de Y-ingang (pen 9).
- Verbind de X-ingang (pen 10) met de massa.
- Verdraai potentiometer P2 tot er 0 V wisselspanning op de uitgang staat.

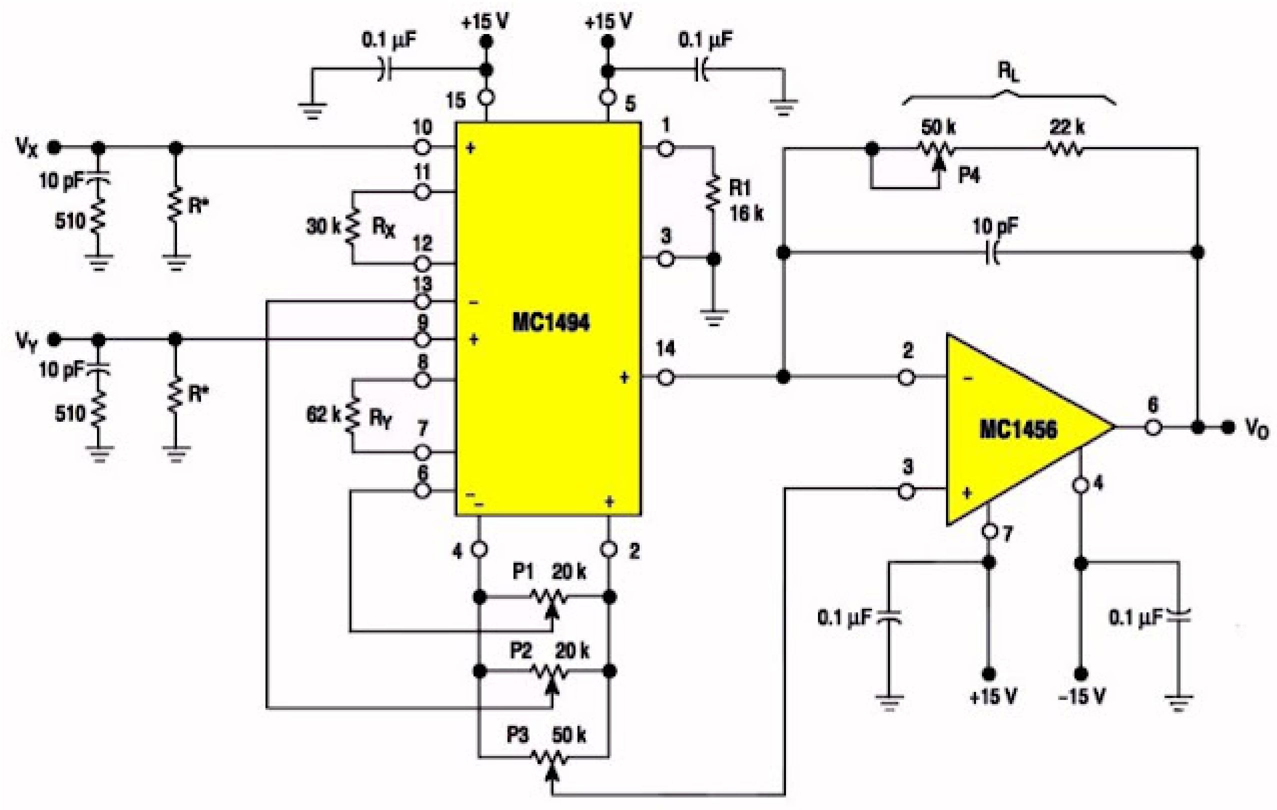
Afregelen van de offset op de Y-ingang
- Sluit een sinus van 1,0 kHz, 5,0 $V_{top\text{-}tot\text{-}top}$ aan op de X-ingang (pen 10).
- Verbind de Y-ingang (pen 9) met de massa.
- Verdraai potentiometer P1 tot er 0 V wisselspanning op de uitgang staat.

Afregelen van de offset op de uitgang
- Verbind beide ingangen (pennen 9 en 10) met de massa.
- Verdraai potentiometer P3 tot er 0 V gelijkspanning op de uitgang staat.

Afregelen van de schaalfactor
- Zet 10 V gelijkspanning op de beide ingangen (pennen 9 en 10).
- Verdraai potentiometer P4 tot er -10 V gelijkspanning op de uitgang staat.

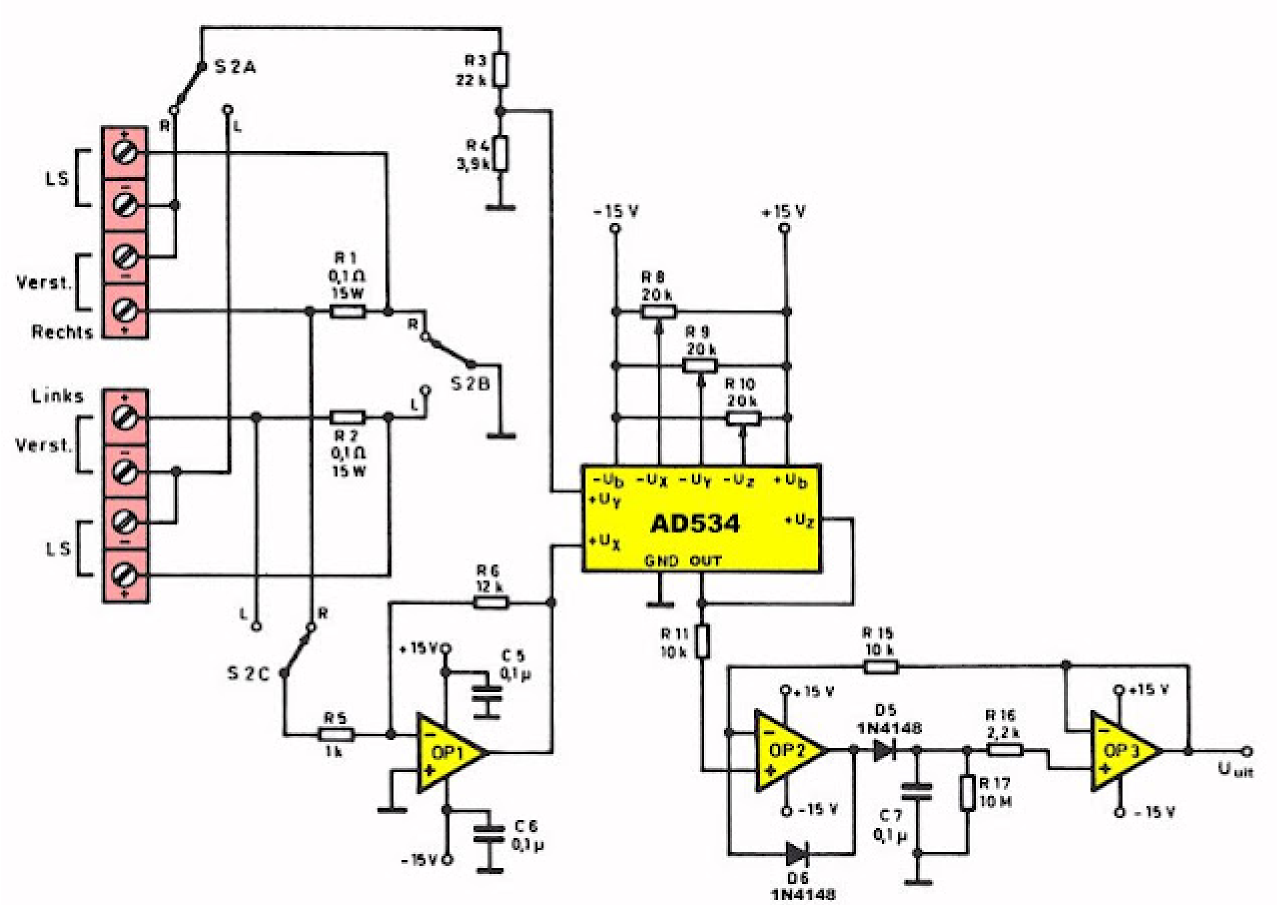
Het is noodzakelijk deze afregelprocedure een aantal malen te herhalen tot alle genoemde

uitgangssignalen kloppen. De beschreven procedure kunt u toepassen bij alle vermenigvuldigers. Het kan natuurlijk voorkomen dat u de schaalfactor op een andere waarde moet afregelen, dat is afhankelijk van de toegepaste schakeling.



Het standaard schema rond de MC1494 geschakeld als analoge vermenigvuldiger. (© ON Semiconductor)

Elektronische vermogensmeter
In de onderstaande figuur is een praktische toepassing gegeven van het analoog vermenigvuldigen van twee signalen. Het schema geeft een schakeling die het vermogen meet dat door een versterker naar de luidsprekers wordt gestuurd. Als stroomsensor weerstanden worden de weerstanden R1 en R2 ingezet. De spanning over de luidspreker wordt via de spanningsverzwakker R3/R4 aan een van de ingangen van de analoge vermenigvuldiger aangeboden. De spanning over de sensorweerstanden wordt met behulp van de operationele versterker OP1 ongeveer tien maal versterkt. Met behulp van de omschakelaar S2 kunt u omschakelen tussen het linker en het rechter kanaal. De wisselspanningen worden vermenigvuldigd door de analoge vermenigvuldiger met differentiële spanningsingangen AD534. Het product, nog steeds een wisselspanning, wordt nadien met een eenvoudige gelijkrichter schakeling rond OP2 en OP3 omgezet in een mooie gelijkspanning. U kunt de uitgangsspanning van OP3 naar een analoge of digitale paneelmeter sturen. Voor de drie op-amp's kunt u de CA3140 toepassen.
Let op dat deze schakeling volledig los moet staan van de schakeling van de versterker, u mag de massa's van beide schakelingen dus niet met elkaar doorverbinden. Ook de voeding moet volledig los staan van de elektronica van de versterker.



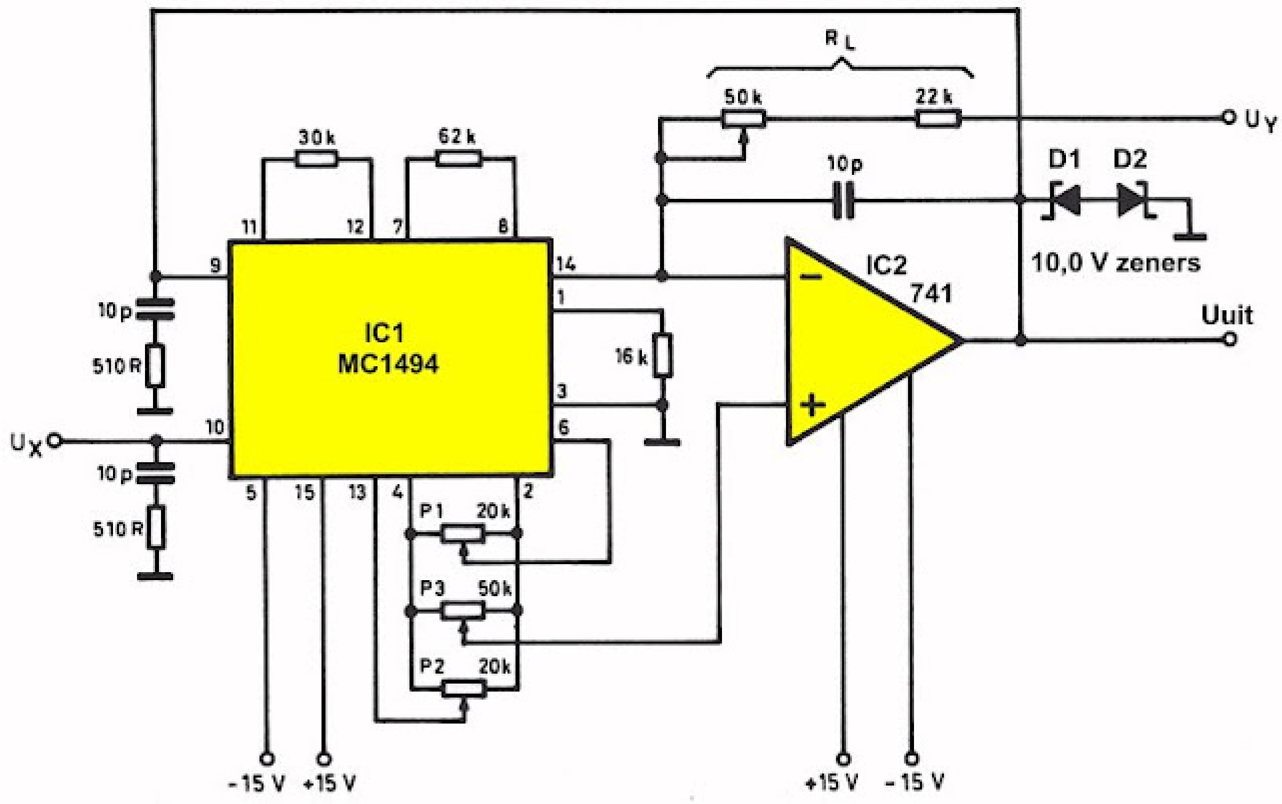
Een analoge vermogensmeter voor audio-toepassingen. (© 2019 Jos Verstraten)

Analoge deler

In de onderstaande figuur is een praktische schakeling getekend van een analoge deler. De schakeling berekent de formule:

$U_{uit} = -[10 \bullet (U_y / U_x)]$

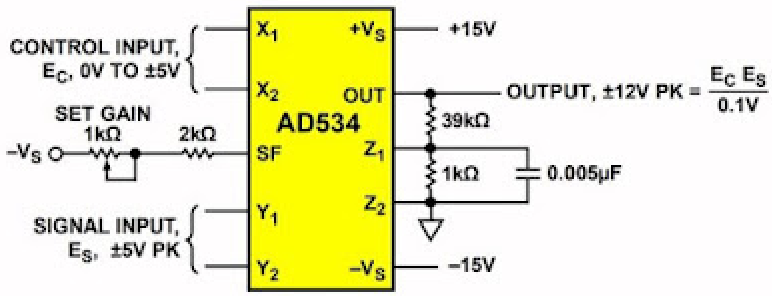
De X-spanning kan alleen positief zijn en kan bovendien niet te klein worden. Zoals u weet levert delen door een klein getal een zeer groot resultaat op. Als de deler 0 wordt, is het resultaat zelfs oneindig groot. De elektronica kan hiermee uiteraard niet omgaan. Als de X-spanning de nul nadert gaat de schakeling instabiliteit vertonen. Het kan zelfs gebeuren dat de schakeling vastloopt tegen een van de voedingsspanningen en in deze situatie volhardt. Dit verschijnsel staat bekend als *'latch-up'*. Deze ongewenste toestand wordt tegengegaan door de twee zenerdioden D1 en D2 van 10 V in de uitgang.



Praktische schakeling van een analoge deler. (© ON Semiconductor)

Breedbandige spanningsgestuurde versterker
In de onderstaande figuur is het schema getekend van een spanningsgestuurde versterker met een bandbreedte van 30 kHz en een maximaal ingangssignaal van 5,0 Vtop-tot-top. De grootte van het uitgangssignaal wordt bepaald door een gelijkspanning E_c tussen 0 en 5 V, de maximale verzwakking bedraagt 60 dB.
Er bestaan natuurlijk ook andere (goedkopere) systemen om een wisselspanning te sturen met een gelijkspanning. Het toepassen van een analoge vermenigvuldiger heeft toch een aantal voordelen:

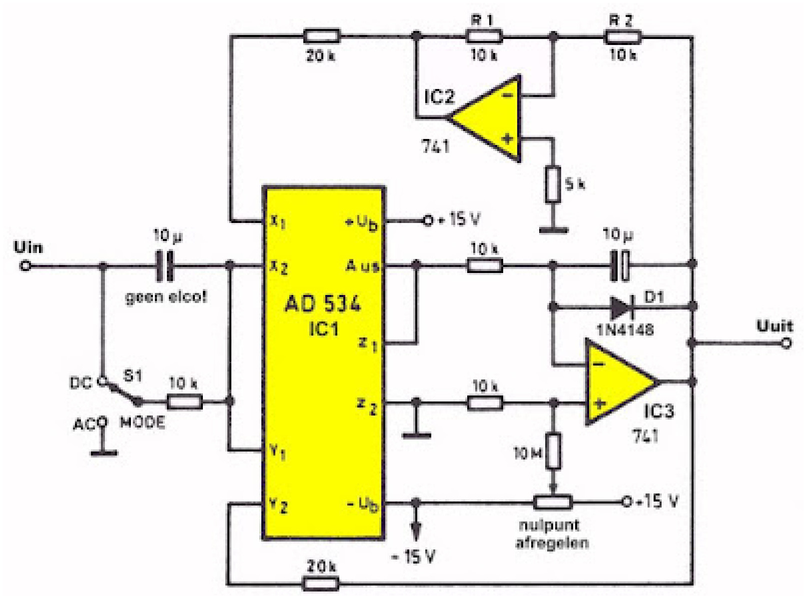
- De schakeling werkt zéér lineair over het gehele regelbereik, waardoor weinig vervorming wordt geïntroduceerd.
- Het stuurbereik is zeer groot omdat de schakeling in theorie bij een stuurspanning van 0 V ook 0 V op de uitgang zet.
- De in- en uitgangsimpedanties van de schakeling zijn volledig onafhankelijk van de grootte van de stuurspanning, zodat voorgaande en opvolgende schakelingen belast respectievelijk gestuurd worden met constante impedanties.



Een spanningsgestuurde versterker. (© Analog Devices)

Effectieve waarde berekenen
In de onderstaande figuur is een effectieve waarde gelijkrichter getekend. Met deze schakeling kunt u het *'thermisch vermogen'* van een willekeurig gevormde wisselspanning berekenen. De echte effectieve waarde van een wisselspanning is een getal dat aangeeft hoe groot een gelijkspanning zou moeten zijn om hetzelfde warmtevermogen in een weerstand op

te wekken. Er bestaan natuurlijk speciale IC's die de effectieve waarde van een wisselspanning kunnen berekenen. Ook die maken in wezen gebruik van een schakeling, die erg op een analoge vermenigvuldiger lijkt.
Het kan echter ook met een echte analoge vermenigvuldiger. De getekende schakeling is bruikbaar tot 1 MHz en heeft bij die frequentie een meetfout van slechts 0,5 %. Tot 60 á 100 kHz kunt u de schakeling zelfs afregelen op een maximale fout van 0,05 %!



Een effectieve waarde gelijkrichter. (© 2019 Jos Verstraten)